高温-冷却处理作用下砂岩宏细微观破坏规律*

王长彬[1,2,3],姜进军[1,2,3],孔惠会[4]

(1.中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺市 113122;
2.煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺市 113122;
3.煤矿灾害防控全国重点实验室, 辽宁 抚顺市 113122;
4.陕西神东天隆矿建工程有限责任公司, 陕西 西安 710002)

摘要:为系统揭示循环热扰动下围岩结构的多尺度响应机制,以山西某矿区致密砂岩为研究对象,构建了涵盖宏观物性演化、力学特性、微结构损伤与细观裂纹模拟的综合研究体系。试验结果表明,自然状态下砂岩的峰值强度为85.00 MPa,经8次0 ℃冷却循环后降至40.50 MPa,降幅达52.35%;不同温度下,砂岩强度随循环次数均呈负指数型衰减规律。弹性模量在首次循环时即发生显著劣化,0 ℃条件下弹性模量降幅高达38.8%;经8次循环后,不同温度下弹性模量的整体降幅为39.3%~61.1%,破坏模式表现为"裂纹汇聚-局部滑移-结构松脱"的复合特征。扫描电镜结果揭示了热循环诱导的"粒间键断-微裂扩展-骨架解体"演化过程,基于离散元的细观模拟进一步捕捉了裂纹的起裂时序与拉剪分型特征,量化展现了结构损伤从边界向核心发展的演化路径。研究结果阐明了宏细观多尺度下温度循环诱发的岩石破坏过程,为矿井地热开发条件下的岩体稳定性预测与多场耦合模拟提供了理论依据。

关键词:温度循环;多尺度破坏;裂纹演化;矿井地热开发;岩体稳定性;离散元模拟

中图分类号:TD315 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0150-14

Macroscopic, Mesoscopic and Microscopic Failure Patterns of Sandstone Subjected to High-Temperature Cooling Treatment

Wang Changbin[1,2,3], *Jiang Jinjun*[1,2,3], *Kong Huihui*[4]

(1.China Coal Technology & Engineering Group Shenyang Research Institute Co., Ltd., Fushun, Liaoning 113122, China;
2.State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun, Liaoning 113122, China;
3.National Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Fushun, Liaoning 113122, China;
4.Shaanxi Shendong Tianlong Mine Construction Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710002, China)

Abstract: To systematically reveal the multi-scale response mechanism of surrounding rock structures under cyclic thermal disturbance, a comprehensive research system encompassing macroscopic physical property evolution, mechanical properties, microstructural damage, and mesoscopic crack simulation was established, taking dense sandstone from a mining area in Shanxi as the research object. The experimental results show that the peak strength of sandstone in its natural state is 85.00 MPa, which decreases to 40.50 MPa after eight 0 ℃ cooling cycles, representing a reduction of 52.53%. The strength of sandstone exhibits a negative exponential decay pattern with increasing number of cycles at different temperatures. The elastic modulus undergoes significant degradation during the first cycle, with a reduction reaching 38.8% under the 0 ℃ condition. After eight cycles, the overall reduction in elastic modulus ranges from 39.3% to 61.1% at different temperatures. The failure mode manifests as a composite characteristic of "crack convergence-local slippage-structural loosening." Scanning electron microscopy results reveal the evolution process of "intergranular bond breakage-microcrack propagation-skeleton disintegration" induced by thermal cycling. Mesoscopic simulation based on the discrete element method further captures the crack initiation sequence and tension-shear differentiation characteristics, quantitatively demonstrating the evolutionary path of structural damage progressing from the boundary to the core. The research findings elucidate the multi-scale rock failure process induced by thermal cycling from macroscopic to mesoscopic levels, providing a theoretical basis for predicting rock mass stability and

* **收稿日期**:2025-08-04
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFC2904104)
作者简介:王长彬(1982—),男,河南商丘人,硕士,副研究员,主要从事矿井通风、防灭火防尘等方面的工作。E-mail:249484687@qq.com

conducting multi-field coupling simulations under mine geothermal development conditions.

Key words: Thermal cycling, Multi-scale failure, Crack evolution, Mine geothermal development, Rock mass stability, Discrete element simulation

0 引言

随着“双碳”战略的深入实施,矿井地热作为煤炭资源开发向绿色能源利用转型的核心方向之一,正逐步从概念验证走向工程实践[1-3]。该技术充分利用生产与废弃矿井中赋存的深部热能资源,具有与煤共采、场地条件成熟、能量回收效率高等显著优势,在保障矿井安全的同时可实现余热回收、供暖制冷等多重效益,是地下空间能源综合利用的典型代表[4-6]。然而,地下地热回采过程中常伴随高温-冷却循环、岩体频繁热扰动与破裂,其工程稳定性与岩体响应规律尚未形成系统认知,亟须开展深入研究[7-9]。

在中深部矿井地热系统中,注采液的多次循环会对热储岩体产生剧烈温差冲击,导致岩石内部热裂纹扩展、强度劣化、渗透通道重构等一系列耦合效应,严重威胁系统的长期安全稳定运行。现有研究已对高温作用后岩石的性质演化开展了初步探讨。李建林等[10]通过三轴试验分析了砂岩在高温热处理后的变形与回弹特性,揭示了温度与波速、强度之间的定量关系。苏承东等[11]结合X射线衍射和扫描电镜技术,研究了不同加热温度下砂岩的矿物组分演化与微观结构损伤特征。陈宇龙[12]聚焦温度、孔隙水压和渗透率的耦合作用,揭示了温度升高与孔压升高共同促进岩体塑化与强度劣化的机制。此外,Kumari等[13-15]对花岗岩进行了冷却速率试验,发现冷却速率梯度显著影响岩石内部裂纹的拓展和强度衰减规律。然而,上述研究多集中于单次加热-冷却或纯高温作用下的岩石性质演化,对频繁循环热扰动下的岩石力学响应规律、裂纹时空演化特征及破坏机制研究仍较为薄弱,难以直接支撑矿井地热的复杂实际工况。

在数值模拟方法方面,离散元法凭借对岩石裂纹起裂、扩展及颗粒尺度热-力行为的精准反演能力,为深入揭示循环温差作用下岩体力学劣化提供了有效手段。Ali等[16]基于PFC软件研究了热损伤下的颗粒学行为。Zhao等[17]模拟了不同冷却方式下的裂纹扩展模式。Qu等[18]采用有限元方法开展了裂缝导热特性分析。尽管如此,目前仍缺乏针对矿井地热工况条件下的细观裂纹演化模型研究,尤其是在多次冷热循环与岩石热破坏耦合过程的模拟与机制揭示方面的研究不足。

基于此,本文针对矿井地热开发中的温度循环扰动过程,开展宏观岩石力学试验、微观结构表征与细观数值模拟相结合的多尺度联合研究。通过控制不同冷却温度与循环次数,系统分析岩石强度、波速、质量等关键物理力学参数的演化特征;借助扫描电镜技术深入剖析热裂纹发展与颗粒剥落过程,揭示热-冷循环交替过程中的细观裂纹扩展、损伤分布与破坏机制。

1 试验样品与试验方案

1.1 砂岩试样制备

本研究选用的砂岩材料取自山西某矿井地下热储层,致密性和均质性良好,是典型的矿井地热能开发环境中的岩层类型。原岩呈灰色,天然密度分布在2.41~2.67 g/cm^{3}范围内,具备工程代表性。为减小试样离散性带来的误差,所有试样均采自同一母岩,并在同一方向上钻取,保证试样结构各向同性。依据国际岩石力学学会(ISRM)推荐标准,将试样加工为直径为50 mm、高度为100 mm的标准圆柱体,剔除含沉积夹层、宏观裂隙或明显缺陷的试样。为保证加载端面平整度与对中精度,试样两端采用机械抛光,表面粗糙度控制在0.02 mm以内,端面垂直度偏差小于0.001 rad。

本试验采用WDAJ-600型岩石剪切-伺服加载系统进行热-力加载,马弗炉提供高温处理环境,高速摄像系统实时记录试样裂纹扩展过程,红外测温仪用于温场监控。采用TM-4000 Plus台式扫描电子显微镜(SEM)观察试样内部结构变化,超声波传播响应由JL-IUA6(A)型超声波检测仪采集分析。

1.2 试验方案

1.2.1 砂岩的物性分析测试

为模拟矿井地热能开发过程中围岩在周期性热扰动环境下的物性响应特征,本试验设计了高温加载与水冷降温交替的热循环试验方案,系统评估砂岩在热-冷循环条件下的质量、体积与纵波波速变化规律。热处理采用马弗炉进行升温模拟,试样初

始温度为常温(约 20 ℃),以 5 ℃/min 的速率均匀升温至 400 ℃,并保持恒温 2 h,保证热能充分传导至试样内部。保温结束后,立即将样品转移至设定温度(0 ℃、20 ℃、50 ℃、80 ℃)的冷却水浴中,完成一次高温-冷却循环。红外测温仪实时监控试样表面温度,当温度趋于水浴温度时视为冷却完成。以模拟井下岩体在高温流体与冷却介质间反复交替的地热运行环境。温度循环次数设定为 8 次,分别在第 1、2、4、8 次循环后进行分阶段测试。每轮循环结束后,对试样进行质量与体积测量,计算其变化率,并通过超声波测试获取砂岩的纵波波速。

1.2.2 砂岩的力学性质分析测试

为探究温度循环影响下的砂岩力学特性,对经历不同热循环的试样开展单轴压缩试验。采用岩石剪切-伺服加载系统进行加载,最大轴向载荷为 600 kN。加载采用位移控制模式,速率设定为 0.05 mm/min。加载过程中同步使用高速摄像系统记录试样的失稳破坏过程,辅助识别裂纹起裂、扩展与贯通特征。通过应力-应变曲线提取力学特征参数,分析热损伤下砂岩的力学响应行为。裂纹观测分为宏观与微观两个尺度。

(1) 宏观方面:试样完成温度循环后进行拍摄,识别热裂纹分布与开裂程度;

(2) 微观方面:从初始状态与 0 ℃不同循环次数处理条件下试样的破碎区域中选取标准化尺寸的薄片,经导电喷镀处理后,置于 SEM 下观察,重点分析热致微裂纹的扩展路径、交错模式、粒间剥离与矿物解理效应等典型微结构变化。

本试验流程完整覆盖了高温加载、快速冷却、循环累积、宏观力学测试与微观表征的全过程,系统模拟了矿井地热开采过程中围岩可能经历的热扰动环境。

2 高温-冷却处理下砂岩物理性质分析

2.1 砂岩质量变化规律

砂岩在经历高温处理后,其质量与体积的变化可直观反映内部结构的损伤程度。作为表征热劣化的重要指标,质量与体积的变化受循环次数与冷却温度耦合作用,呈现出明显的演化规律。本研究将砂岩试样升温至 400 ℃后快速冷却,以模拟矿井地热开采过程中围岩承受的热扰动条件。该温度虽未达到黏土矿物或石英的相变温度,但足以引发不同结合态水分(如附着水、结合水)的大量逸出。已有研究表明,150~200 ℃即可驱散弱结合水与强结合水[19-20],因此水分逸出是前期质量变化的主导因素。

每轮热处理结束后,采用精度为 0.01 g 的电子天平测定试样质量,并按式(1)计算质量变化率。

$$\eta_m=\frac{m_0-m_N}{m_0}\cdot 100\% \tag{1}$$

式中:η_m 为质量变化率,%;m_0 为试样初始质量,g;m_N 为试样高温-冷却处理后的质量,g。

不同温度循环条件下的岩石质量变化率如图 1 所示。由图 1 可知,质量损失随循环次数的增加而增大,且前 2 次循环的质量损失约占总损失量的 80%。此阶段质量变化主要由水分逸出引起。随着循环进一步进行,尤其在冷却温度较低(如 0 ℃)时,出现了明显的颗粒剥落现象。试样表面热裂纹扩展加剧,导致砂岩颗粒剥离并沉积于冷却液中,冷却液中可观察到大量砂石残渣。这表明,在多次热循环作用下,岩体劣化过程由单一水分逸出向结构破碎转变,体现了热冲击损伤的累积性。

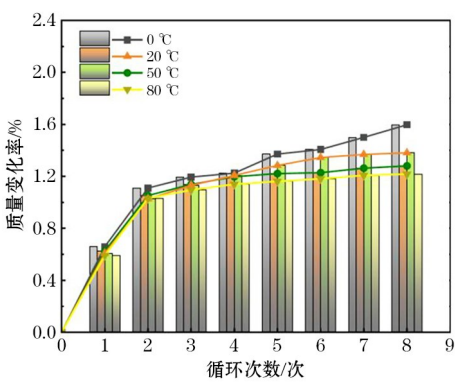


图 1 不同温度循环条件下的岩石质量变化率

Fig.1 Mass change rate of rock under different temperature cycling conditions

体积变化率是另一个重要的物理表征指标,同样反映了温度循环下岩体的结构演化行为,其计算公式如式(2)所示。

$$\eta_v=\frac{V_N-V_0}{V_0}\cdot 100\% \tag{2}$$

式中:η_v 为试样体积变化率,%;V_0 为试样初始体积,m^3;V_N 为试样高温-冷却处理后的体积,m^3。

不同温度循环条件下的岩石体积变化率如图 2 所示,试样体积变化率随热循环次数增加呈现缓慢膨胀趋势,并最终趋于稳定。第 8 次循环后,不同冷却温度下试样体积变化率分别增加至 0.95%(80 ℃)、1.06%(50 ℃)、1.17%(20 ℃)与 1.34%(0 ℃),

整体呈现出冷却温度越低、体积膨胀越显著的规律。热膨胀与微裂缝扩展是体积变化的双重驱动机制。高温引起矿物晶格热膨胀,而冷却过程中剧烈的温差产生热应力集中,促使微裂隙发育,为岩体整体膨胀提供了空间。综上,质量与体积的协同变化揭示了砂岩在热循环过程中的结构演化路径:前期以水分逸出为主,中后期以裂纹扩展主导的颗粒剥落与体积膨胀为主。

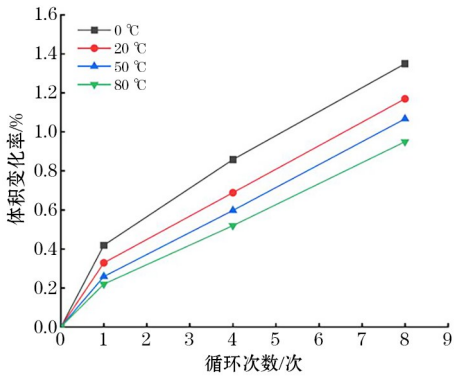


图 2 不同温度循环条件下的岩石体积变化率

Fig.2 Volume change rate of rock volume under different temperature cycling conditions

2.2 砂岩波速变化规律

纵波波速是一个高度敏感的物性指标,可有效反映岩体内部结构连续性与损伤积累程度。不同温度循环条件下的岩石纵波波速变化曲线如图 3 所示。试验结果表明,纵波波速随循环次数增加呈单调递减趋势,表明高温-冷却循环扰动对介质刚度造成持续劣化。值得注意的是,纵波波速在前期降幅较大,随后逐渐趋于平缓,反映了热损伤过程的阶段性演化特征。

初始阶段,岩体内部存在的自由水和弱结合水,在升温过程中迅速逸散,导致孔隙率增大与介质不连续性增强,从而显著降低纵波波速。进入后期,水分已基本逸出,此时裂缝萌生与扩展逐步成为纵波波速降低的主导因素。裂隙在波传播路径上形成更多散射与反射界面,从而进一步降低纵波波速。此外,冷却温度梯度显著影响微裂隙的发育程度。在相同循环次数下,冷却温度越低,试样受到的热应力冲击越剧烈,导致裂缝密度增大与颗粒剥离加剧。以 0 ℃冷却条件为例,其纵波波速衰减幅度最大,证实了低温冷却导致岩石的结构破坏更为严重的结论。这一现象与前文的质量变化规律保持一致,进一步验证了裂隙发育在多次热循环下的累积性作用。

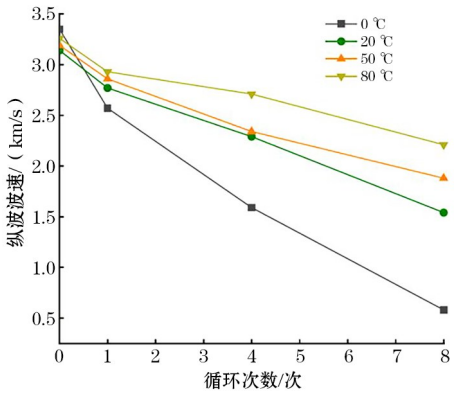


图 3 不同温度循环条件下的岩石纵波波速变化曲线

Fig.3 Variation curves of longitudinal wave velocity of rock under different temperature cycling conditions

3 砂岩力学行为与破坏模式分析

3.1 应力-应变曲线差异性规律

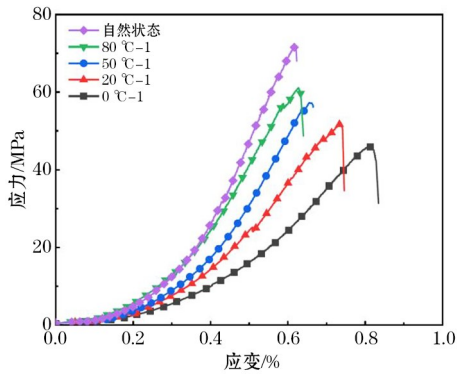
图 4 展示了砂岩在自然状态与不同冷却温度(0 ℃、20 ℃、50 ℃、80 ℃)下,经历多轮热循环后的典型应力-应变响应曲线。试样命名遵循“冷却温度-循环次数”的格式,如“0 ℃-1”表示试样经历 1 次 0 ℃冷却条件的处理。对比可见,自然状态砂岩表现出最高的峰值强度和最低的峰值应变,而经热处理后的试样呈现强度下降与变形能力增强的趋势,此变化趋势随冷却温度降低与循环次数增加而更加显著。

应力-应变曲线整体可划分为四个阶段:微结构压密、准线弹性、非线性过渡与最终失稳。微结构压密阶段的延长反映出内部孔隙率升高与微结构完整性削弱,其程度与循环次数呈正相关,表明热扰动导致孔隙扩张与微裂纹萌生。进入准线弹性阶段后,曲线斜率逐步减缓,表明弹性模量随循环强度的增大而退化。这一变化源于微裂纹界面在初始加载阶段逐步张开,削弱了岩体整体的弹性响应能力,表现出典型的热软化特征。

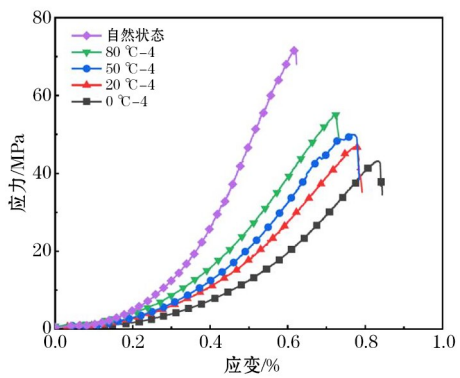
非线性过渡阶段是破裂演化的关键区间。在该区间,岩石内部微裂纹逐步定向扩展,导致应力传递路径发生动态重构。冷却温度越低,非线性过渡阶段越长,应变增长越显著,反映出热应力诱导的微结构协同破坏效应更显著。最终失稳阶段表现为主裂面贯通与残余强度衰减。

值得注意的是,冷却温度在试验范围内对岩石破裂模式影响相对有限,而循环次数的影响更为显著。多轮热循环引发裂隙网络从初生状态向联通结

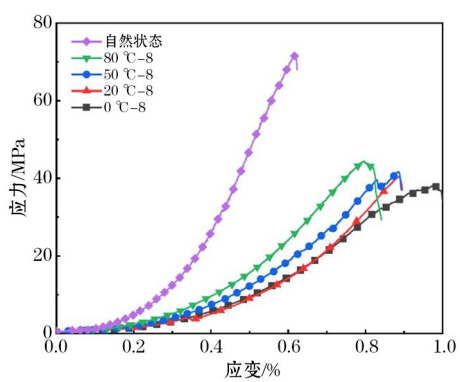
构演变,是控制力学退化路径的主控机制。结合前文物性参数分析,可推断岩体在热-冷交替环境中存在明显的阶段式损伤演化过程:初期以脱气与空隙膨胀为主,中期由弹性退化转向微裂隙协同扩展,末期则表现为结构失稳与裂面聚合。



(a) 高温-冷却循环处理 1 次



(b) 高温-冷却循环处理 4 次



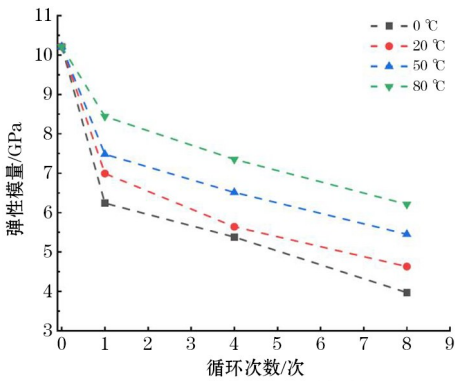
(c) 高温-冷却循环处理 8 次

图 4 不同温度循环条件下的岩石应力-应变响应曲线

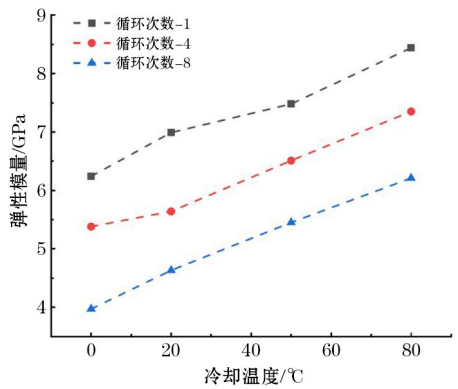
Fig.4 Stress-strain response curves of rock under different temperature cycling conditions

3.2 力学特征参数演化规律

图 5 展示了砂岩在不同热循环次数与冷却温度条件下的弹性模量变化规律。结果表明,高温-冷却循环对岩体刚度的影响具有显著的累积性和非线性特征。无论冷却温度如何,首次热循环均引发了最剧烈的弹性模量下降:0 ℃冷却条件下首轮循环导致弹性模量降幅高达 38.8%,远高于 80 ℃条件下的 17.3%。这表明初始热扰动在岩石内部引发了以脱气、微裂纹界面重组与结构松弛为主的快速损伤机制,为后续模量持续退化奠定了基础。



(a) 循环次数与弹性模量的关系



(b) 冷却温度与弹性模量的关系

图 5 不同热循环次数与冷却温度下的岩石弹性模量变化规律

Fig.5 Variation laws of elastic modulus under different thermal cycles and cooling temperatures

由图 5(a)可知,随着热循环次数增加,弹性模量呈持续下降趋势,但变化速率逐步趋缓,表现出典型的"应变软化-结构稳定"阶段性响应。这种变化速率减缓并非弹性模量恢复,而是由于裂纹扩展与能量耗散趋于饱和,已有破裂路径的空间分布限制了微裂隙的进一步增长。在 8 次循环结束后,试样弹性模量较自然状态(10.20 GPa)的降幅随冷却温度不同分别达到 39.3%(80 ℃)、46.6%(50 ℃)、54.4%(20 ℃)和 61.1%(0 ℃),整体退化程度呈"强热冲击→刚度塌缩"的累积趋势。

由图 5(b)可知,在相同循环次数下,弹性模量与冷却温度呈正相关,即冷却温度越高,弹性模量残余值越接近原始状态。这一现象说明,低温水冷所诱导的热应力梯度更剧烈,更容易诱发微裂纹的界

面脱黏与应力集中,从而加快模量劣化进程。这种“模量温敏性”在前几轮循环中表现尤为明显,表明首次温度扰动在损伤形成中起主导作用。

从结构角度来看,弹性模量的下降实质上反映了岩体抵抗弹性变形能力的弱化,是热损伤累积效应的重要物理指标。这种刚度退化不仅是多场耦合下裂隙微结构重构的宏观响应形式,也会直接影响岩体的应力分布与能量释放机制。因此,弹性模量变化曲线的斜率、拐点与平台期,可作为评估热储岩体长期服役稳定性与损伤阈值演化的重要参考。

图 6 为砂岩在多轮高温-冷却处理条件下的峰值应力随循环次数变化的拟合关系曲线,具体拟合关系式如式(3)所示。

$$\begin{cases} y_0 = 42.47\exp(-x_0/0.73)+42.54 \\ y_{20} = 39.71\exp(-x_{20}/1.10)+45.09 \\ y_{50} = 36.38\exp(-x_{50}/1.49)+48.36 \\ y_{80} = 35.86\exp(-x_{80}/2.12)+47.83 \end{cases} \tag{3}$$

式中:y_i为不同冷却温度与热循环次数下的峰值应力,MPa;x_i为不同冷却温度下的热循环次数;i 为试验温度,分别为 0 ℃、20 ℃、50 ℃、80 ℃。

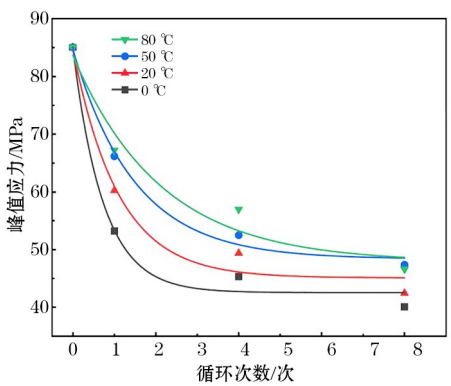


图 6 峰值应力随热循环次数变化的拟合关系曲线

Fig.6 Fitting relationship curves for variation of peak stress with thermal cycles

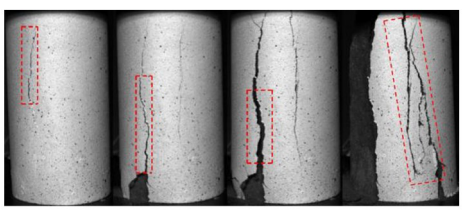
自然状态下砂岩强度为 85.00 MPa,在经历 8 次 0 ℃冷却后降至 40.50 MPa,总降幅达 52.35%,体现出热-冷交替对岩体抗压性能的显著削弱作用。尤其在首轮循环中,温差诱导的热应力场促使裂纹萌生与骨架结构局部松弛,导致强度陡降,表现出明显的热损伤效应。

在不同冷却温度条件下,峰值强度随循环次数增加呈现“快速衰减-减速趋稳”的非线性演化特征。首次循环中,冷却温度越低,强度降幅越大,最高与最低温条件下的降幅相差超过 2.5 倍,说明温差越大、岩体微结构响应越剧烈。进入中后期,损伤累积导致裂隙趋于饱和,冷却温度的主导效应减弱,峰值应力逐步接近残余承载水平。为量化强度演化路径并实现预测,构建了上述式(3)所示的经验型指数函数,从数学层面揭示了热疲劳主控下岩体承载性能的指数级递减规律。

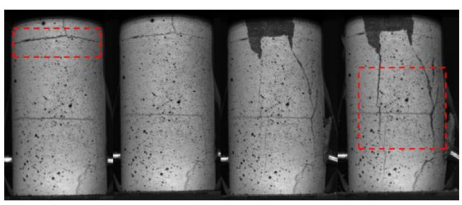
进一步分析可知,冷却温度主要在前期控制断裂起裂阈值与局部损伤速率,而热循环次数则主导裂缝系统的时序扩展和结构失稳演化。循环次数达到 8 次后,各冷却温度间的强度差异逐渐收敛,说明岩体趋近力学极限,温度参数的影响已不足以对岩体承载能力产生显著影响。总体来看,峰值强度的递减过程实质体现了热致裂隙演化与承载刚度退化之间的强耦合行为,其变化趋势不仅可用于刻画岩体的热累积损伤过程,也可作为识别热失稳风险等级的依据。

3.3 砂岩宏观破坏模式分析

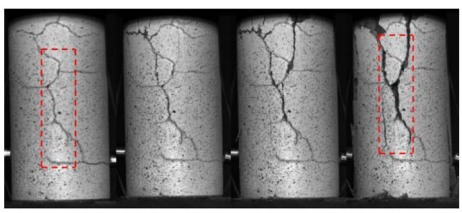
图 7 至图 10 展示了砂岩在不同冷却温度(0 ℃、20 ℃、50 ℃、80 ℃)下,经历 1、4、8 次高温-冷却循环后的单轴压缩破坏形态。整体趋势表明,冷却温度与热循环次数共同控制了试样从单机制破裂向多路径协同失稳的演化路径,体现了热致损伤与外加载荷之间的强耦合破坏机制。



(a) 高温-冷却循环处理 1 次



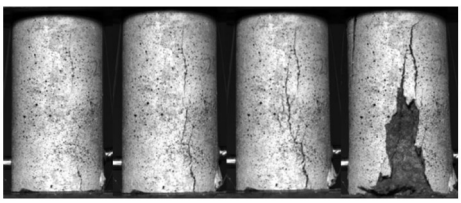
(b) 高温-冷却循环处理 4 次



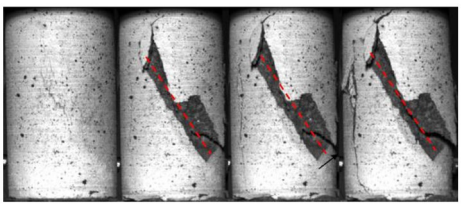
(c) 高温-冷却循环处理 8 次

图 7 0 ℃温度循环作用下砂岩宏观破裂模式

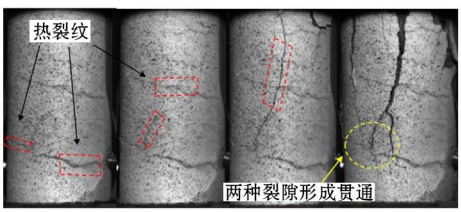
Fig.7 Macroscopic fracture modes of sandstone under temperature cycling at 0 ℃



(a) 高温-冷却循环处理 1 次



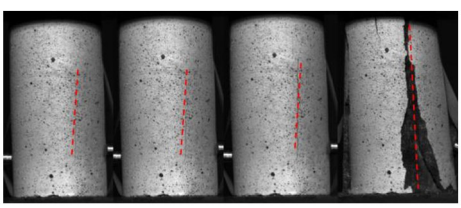
(b) 高温-冷却循环处理 4 次



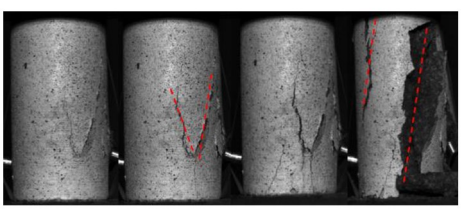
(c) 高温-冷却循环处理 8 次

图 8 20 ℃温度循环作用下砂岩宏观破裂模式

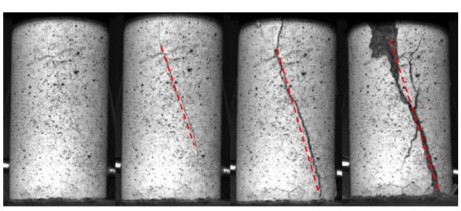
Fig.8 Macroscopic fracture modes of sandstone under temperature cycling at 20 ℃



(a) 高温-冷却循环处理 1 次



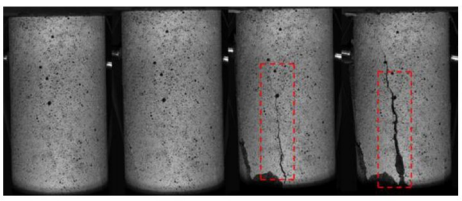
(b) 高温-冷却循环处理 4 次



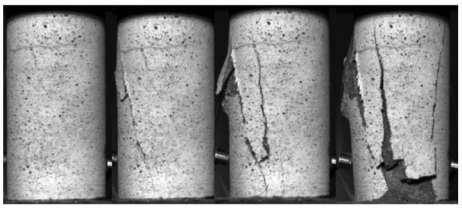
(c) 高温-冷却循环处理 8 次

图 9 50 ℃温度循环作用下砂岩宏观破裂模式

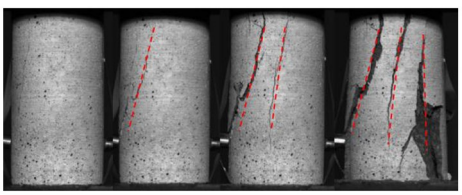
Fig.9 Macroscopic fracture modes of sandstone under temperature cycling at 50 ℃



(a) 高温-冷却循环处理 1 次



(b) 高温-冷却循环处理 4 次



(c) 高温-冷却循环处理 8 次

图 10 80 ℃温度循环作用下砂岩宏观破裂模式

Fig.10 Macroscopic fracture modes of sandstone under temperature cycling at 80 ℃

在 0 ℃冷却条件下,试样在首次循环后整体结构仍保持完整状态,破坏模式以轴向张拉开裂为主,裂隙分布规则,试样表面未观察到明显的热诱导裂纹。第 4 次循环后,试样表面可见前期热循环形成的细裂纹痕迹,在单轴压缩加载过程中成为裂纹的优先生长路径,断裂模式转变为以剪切带偏移为特征的张拉-剪切复合破坏,表明热疲劳作用已显著削弱材料内部的均质性,导致岩体结构内部应力场发生重分布。第 8 次循环后,裂纹形态呈现为大开度、多源头、趋于互连的网状结构,破坏过程中裂缝沿既有热损伤面加速扩展,最终破断面不再与主应力轴平行,出现典型的裂纹重构与损伤通道激活现象,表明热诱导预裂已在宏观破坏路径中占主导地位。

在 20 ℃冷却条件下,试样的结构演化趋势与 0 ℃条件类似,但响应损伤存在滞后,裂缝从点状萌生到面状贯通的阶段演化过程更为缓慢。循环前期试样仍表现为以张拉破坏为主,至第 4 次循环时,前期形成的热裂纹开始与加载诱发裂纹产生路径叠加效应,破裂界面沿结构弱化区域拓展,呈现“裂纹汇聚-局部滑移-结构松脱”的复合破坏机制。第 8 次

循环后,断面特征变为斜裂与层裂交错并存,反映出冷却温度对破裂形态具有渐进调控作用。

相比而言,50 ℃与 80 ℃冷却条件下,即使循环至 8 次,试样表面仍无明显热裂损迹象,破裂形态相对单一,仍表现为稳定的轴向张拉或剪切开裂,破坏路径与应力主控方向一致,未观察到由热预裂重构主导的破坏模式迁移。这一对比表明,在温差梯度较小的条件下,岩体结构稳定性维持时间更长,裂隙系统的激活阈值未被有效突破,破坏仍由加载应力集中主导。

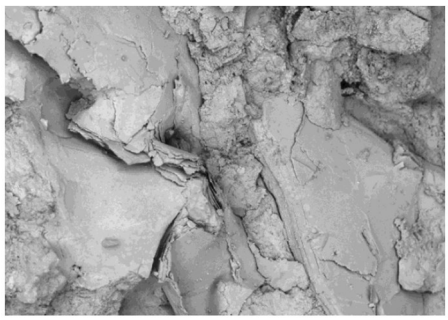
综合分析表明,冷却温度梯度越大,岩体结构受扰动越剧烈,试样达到断裂形态复杂化的循环阈值越低。高温-冷却交替加载通过诱导热疲劳与微结构劣化,显著加速了裂纹界面解耦、失稳路径重构与裂隙连通过程。热诱导裂纹不仅降低了岩体的残余强度,还在加载前形成了潜在的破裂界面,成为控制最终破裂模式与能量释放路径的关键因素。

3.4 砂岩微观破坏模式分析

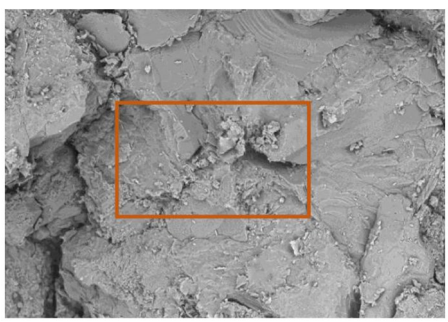
为深入揭示高温-冷却循环诱导下砂岩结构劣化的微观演化机制,本文重点选取温差最大、裂纹演化最显著的 0 ℃冷却工况,对不同循环次数下的试样表面进行 SEM 观察,结果如图 11 所示。

结果表明,随着循环次数从 1 次增至 4 次、8 次,试样依次经历了由界面微扰动到颗粒分离,再到结构骨架破碎的连续演化过程。自然状态下,砂岩表面整体致密,微裂隙主要沿矿物颗粒天然界面离散分布,表明内部结构未受热应力显著扰动;首次循环后,可观察到粒间接触点开始发生局部脱黏,表面出现短小热裂纹与少量脱落颗粒,表明界面键断裂已初步发生;至第 4 次循环时,微裂纹进一步扩展为次级孔隙,沿晶粒边界呈协同扩展趋势,界面黏结性能显著下降,表面粗糙度明显增大,局部区域出现亚穿晶裂纹扩展迹象;第 8 次循环后,砂岩表面呈现典型蜂窝状结构,颗粒间连接完全失效,晶体骨架遭到严重破坏,表面颗粒解体剥蚀现象普遍,微结构劣化已进入临界阶段。

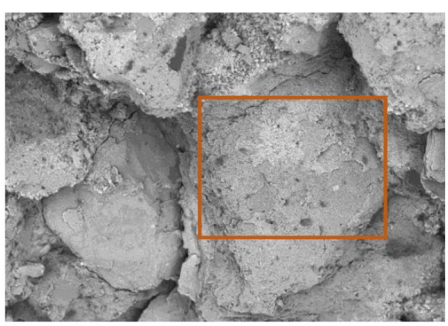
这一演化过程揭示了温度循环诱导下的典型“粒间断键迁移-微裂协同贯通-骨架整体破坏”劣化机制,其主要受高频热膨胀-收缩应力扰动驱动。热应力在晶粒界面富集,且由于不同矿物的热弹性质存在差异,会产生显著的热应力失配,导致微裂纹在矿物界面优先生长,多次循环冷却则进一步加剧了结构错配与局部应力集中释放,进而推动粒间脱黏与界面滑移。这一微损伤演化过程不仅是岩体强度劣化的微观基础,也直接决定了其宏观变形与破坏特征。



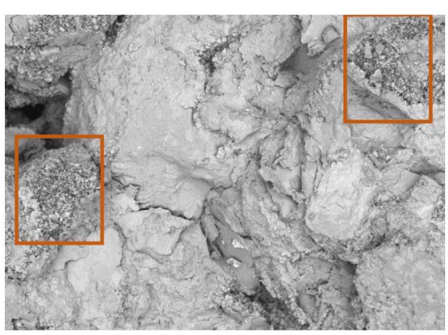
(a) 自然状态



(b) 高温-冷却循环处理 1 次



(c) 高温-冷却循环处理 4 次



(d) 高温-冷却循环处理 8 次

图 11 0 ℃温度循环作用下砂岩微观破裂模式

Fig.11 Microscopic fracture modes of sandstone under temperature cycling at 0 ℃

4 高温-冷却处理诱导细观裂纹分析

4.1 离散元建模及模型验证

为深入揭示温度循环条件下砂岩的裂隙演化机制,仅依靠宏观力学测试和微观表征(如 SEM)难以全面揭示岩体内部裂纹的动态演化过程。宏观力学测试虽能获取岩石整体强度与弹性模量等宏观参数变化,但无法追踪内部裂纹的起裂、扩展与贯通路径;微观表征则多为静态结果,难以反映损伤演化的时序特征。为此,本节采用颗粒流离散元法(PFC)建立细观模型,从细观尺度出发,模拟岩石在高温-冷却循环下的细观裂纹演化过程。

为有效构建能真实反映砂岩热响应特征的数值模型,基于试样的 X 射线衍射分析结果,提取岩石中主要矿物组分及其热物理性能差异,作为细观建模的基础。4 类主要矿物组分包括石英(体积分数 41.9%,热阻抗 24.3×10^{-6})、长石(体积分数 24.92%,热阻抗 8.7×10^{-6})、黏土矿物(体积分数 22.36%,热阻抗 14.1×10^{-6})及方解石(体积分数 10.82%,热阻抗 3.0×10^{-6}),各矿物比热容统一设置为 1 015 J/(kg·K)。建模时选取颗粒半径为 0.2~0.5 mm,密度设为 2 650 kg/m^3,共生成 10 400 个颗粒,以构建等效岩样,如图 12 所示。

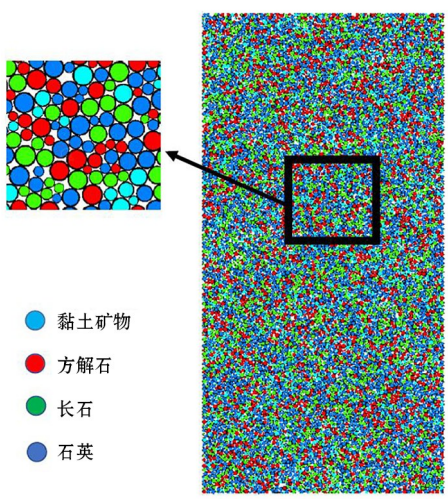


图 12 砂岩的离散元数值模型

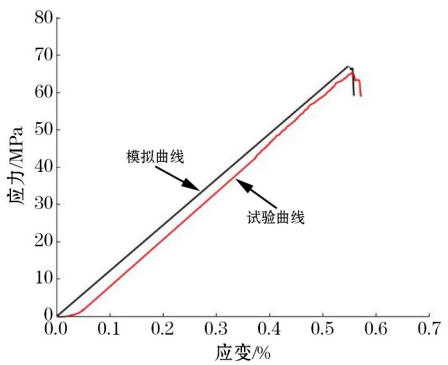
Fig.12 Discrete element numerical model of sandstone

由于 PFC 建模中颗粒与接触的细观参数无法直接通过试验获取,以室内单轴压缩试验所得应力-应变曲线为拟合依据,采用试错法反推得到细观参数集合,详细参数见表 1。为验证该参数体系的准确性,对未经温度处理的模型试样进行加载模拟,并与实测应力-应变曲线对比(见图 13(a)),结果显示,模拟曲线与试验曲线在峰值应变和破坏模式上高度吻合,最大相对误差小于 0.02%。进一步观察数值模型中的裂纹分布模式(见图 13(b)、图 13(c))可知,该细观参数能有效捕捉单轴压缩下张拉主控的破坏模式,因此该模型参数可靠性较高。

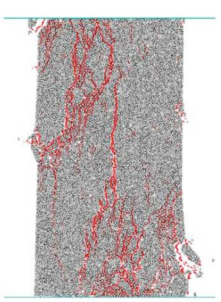
表 1 颗粒流数值模型细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters of the particle flow numerical model

颗粒最小半径/mm	颗粒最大半径/mm	颗粒孔隙度率	颗粒密度/(kg/m^3)	颗粒刚度比	阻尼比
0.3	0.6	0.2	2 650	1.0	0.6
变形模量/GPa	**平行黏结黏聚力/MPa**	**平行黏结抗拉强度/MPa**	**平行黏结变形模量/GPa**	**摩擦因数**	**平行黏结摩擦角/(°)**
19	85	35	19	0.4	26.3



(a) 应力-应变曲线验证



(b) 数值样品验证



(c) 实物样品验证

图 13 离散元数值模型的有效性验证

Fig.13 Validity verification of the discrete element numerical model

为模拟矿井地热资源开采条件中岩石经历的高温-冷却循环过程,数值模拟试验采用热-力耦合加载方式,模拟温度循环过程。模型边界设置为具备传热属性的刚性墙体,加热墙温度设定为 473 K,冷却墙体分别设置为 273 K、293 K、323 K 和 353 K,模拟不同冷却温度下的热循环过程。初始时刻模型温度统一为 293 K。通过 FISH 函数编程判断墙体

邻域颗粒温度变化,当该区域温度逼近边界温度阈值时,视为完成一次热交换循环。每个完整循环包括加热-保温-降温 3 个阶段,单周期热处理时间与真实试验中的 2 h 热负荷过程保持一致。上述过程重复执行 8 次,模拟完整温度扰动加载工况,用于探究多周期热环境下岩体裂纹演化与稳定性劣化规律。

4.2 不同循环次数下的细观裂纹分析

为揭示温度循环作用下砂岩裂纹演化的细观特征,图 14 至图 17 展示了试样在不同冷却温度(0 ℃、20 ℃、50 ℃、80 ℃)条件下经历第 1、4、8 次循环后的裂隙分布状态,图 18 为不同工况下裂纹数量的量化统计结果。模拟过程中将每个热循环划分为高温加载阶段与降温冷却阶段,分别标记为加热(H)与冷却(C),如(H-1)表示首次加热结束后的状态。“红色”代表张拉裂缝,“绿色”则为剪切裂缝(颜色标识见电子版),用以区分不同的破裂机制。

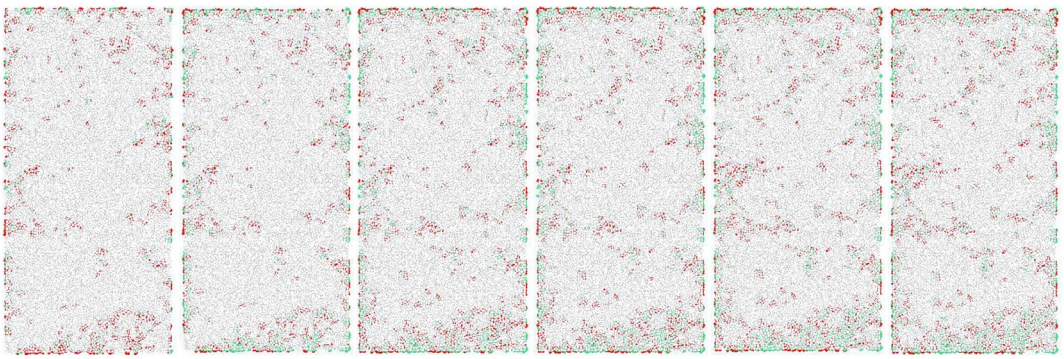


图 14 0 ℃温度循环作用下砂岩细观破裂模式

Fig.14 Mesoscopic fracture modes of sandstone under temperature cycling at 0 ℃

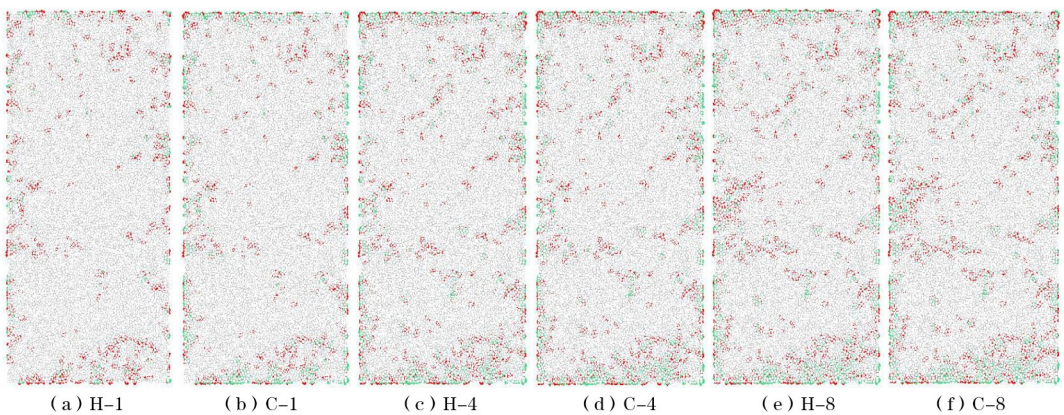


图 15 20 ℃温度循环作用下砂岩细观破裂模式

Fig.15 Mesoscopic fracture modes of sandstone under temperature cycling at 20 ℃

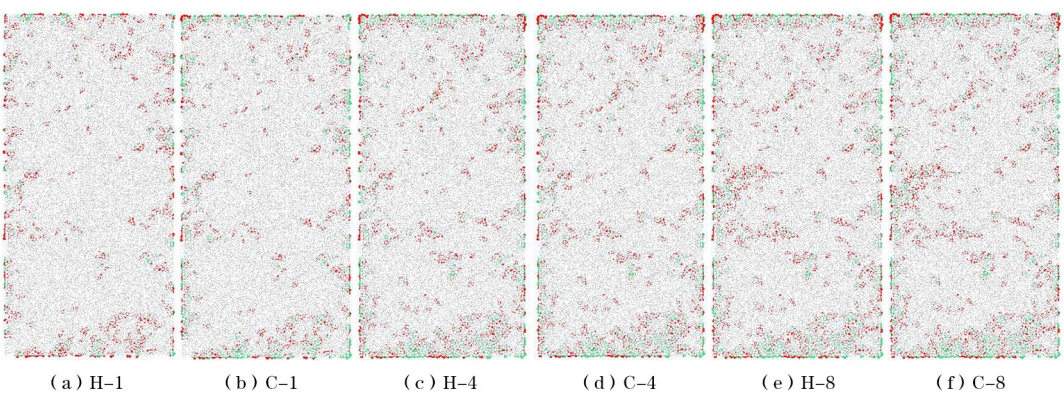


图 16 50 ℃温度循环作用下砂岩细观破裂模式

Fig.16 Mesoscopic fracture modes of sandstone under temperature cycling at 50 ℃

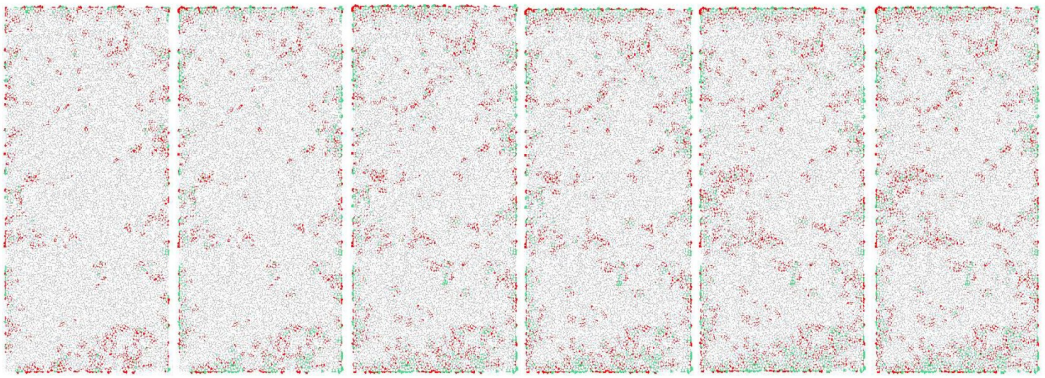


图 17 80 ℃温度循环作用下砂岩细观破裂模式

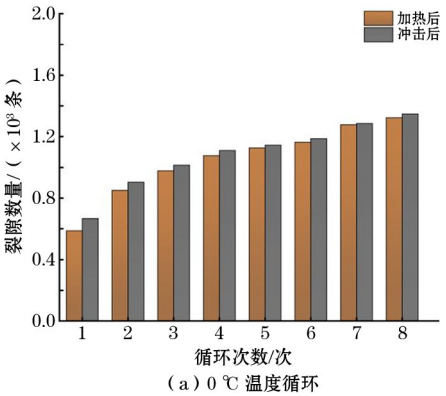
Fig.17 Mesoscopic fracture modes of sandstone under temperature cycling at 80 ℃

数值模拟结果表明,不同冷却温度下,裂纹总数均随循环次数的增加而显著增加,且裂纹分布呈现由试样边缘向内部核心扩展的规律。空间分布上,剪切裂纹多集中在试样外围区域,主要受温度梯度诱导剪应力控制;而张拉裂纹更易在试样内部萌发、贯通,反映出热应变集中导致的拉应力主导破坏机制。

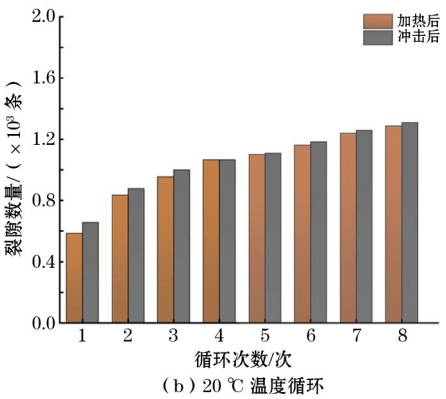
在同一冷却温度下,裂纹的扩展主要发生在前期循环阶段,前 3 次循环已产生近 75%的裂纹,首次循环后裂纹数量增量约占总数的 15%,后续循环裂纹增幅逐步减缓并趋于稳定。这一特征表明,岩石结构在初期热扰动中已发生显著损伤,后续循环的损伤演化更多为前期累积效应的延续。以冷却温度为变量分析可知,低温条件(如 0 ℃)下裂纹扩展效应更为明显:无论循环早期或末期,低温条件下的裂纹数量相较于 80 ℃冷却条件裂纹数量均高出约 5%。且该差异在整个循环周期中保持稳定,反映出高温-冷却梯度主导的热裂纹响应具有可预测性。

对循环处理结束后的裂纹类型进行统计,发现张拉裂纹在所有工况下均占据主导地位,且裂纹数量的增长主要发生在降温冷却阶段,而非加热阶段。这说明温度骤降引起的非均匀收缩是裂纹演化的主要驱动因素,其产生的热拉应力场在循环初期即可激活大量微裂缝。从热-力耦合机制分析,高温-冷却过程中形成的非均匀性应力场诱导裂纹先在表层启动,随后向内部协同发展,裂纹间的尖端应力集中促进效应使裂隙连接形成网络,最终演化为宏观贯通破裂面。热应力诱导的裂纹演化不仅受温差大小控制,也与温度循环的频次紧密相关。

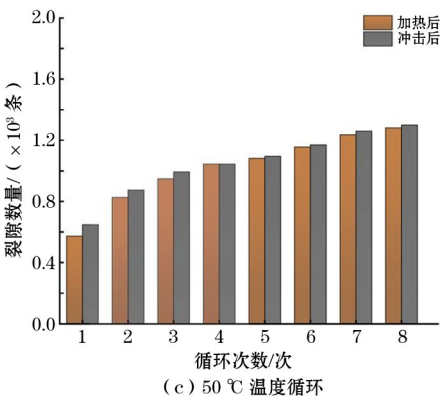
综上,本研究采用离散元数值计算方法完整捕捉了温度循环下裂纹萌生与扩展的全过程,为深入理解高温地下环境中岩体稳定性演化提供了细观力学依据,可为矿山地热开采或深部工程中热扰动驱动下的裂隙预测与控制分析提供理论支撑。



(a) 0 ℃温度循环



(b) 20 ℃温度循环



(c) 50 ℃温度循环

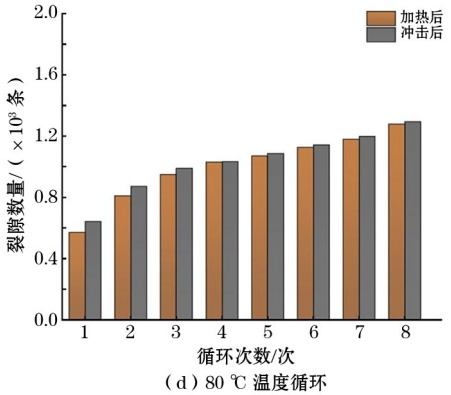


图 18　热循环次数与裂纹数量的演化规律

Fig.18　Evolution laws of crack number with thermal cycles

5　多尺度响应与工程启示

5.1　多尺度破坏特征的一致性响应

本研究围绕砂岩在高温-冷却循环作用下的力学响应与损伤演化机制，建立了涵盖宏观力学试验、微观 SEM 表征与细观离散元模拟的多尺度研究体系。结果表明，温度循环不仅在宏观上表现为弹性模量和峰值应力的显著衰减，更在微观层面上诱发多级次生裂纹的萌生与扩展，其机理本质上源于热应力梯度驱动下的非均匀膨胀-收缩过程，呈现出多尺度破坏特征的协同响应规律。

从宏观试验结果来看，温度循环显著降低了岩石的弹性模量与峰值强度，且呈现出典型的非线性退化规律。其中，首次循环对物性参数的削弱作用最为强烈，而后退化速率逐渐趋缓，最终进入平台期，这与裂纹演化初期应力集中与结构重构频繁、后期裂隙趋于饱和的物理过程高度吻合。微观 SEM 表征结果显示，砂岩展现出由表面粗化、颗粒脱落到蜂窝状孔隙发育的演化过程，揭示了循环温差驱动下砂岩内部结构的非均匀演化特征。细观离散元模拟进一步验证了这一多尺度趋势：裂纹初期多集中于试样模型边缘，随后向内部核心区域扩展，且张拉裂纹始终占主导作用。随着循环次数的增加，裂纹数量增长呈非线性趋势，符合宏观性能突降的试验观测结果。这种裂纹从外缘向内核的扩展规律，以及裂纹类型（剪切、张拉裂纹）的区分方法，为后续裂隙导流与渗透演化模拟奠定了细观结构基础。

5.2　损伤演化的热力机理

温度循环诱导下的岩石损伤，本质上源于两种热-力不匹配机制的耦合作用：一是不同矿物组分间热膨胀系数差异所产生的内生热胀应力；二是冷却过程中温度梯度差异造成的瞬态应力重分布。尤其在大温差循环条件下，当热应力超越材料极限后，会优先在晶界或弱胶结区诱发微裂纹。随着循环次数增加，裂纹不断汇聚、扩展直至贯通，呈现出典型的疲劳式断裂演化。数值模拟中热裂纹主要集中在模型边缘，也可从“边界传热-内部积热”的非均匀扩散机制加以解释。

此外，黏土矿物、长石等亲水组分在循环加热中也会脱水并引发晶格收缩，进一步削弱结构完整性。结合 XRD 测试与热参数设置，本文模型已初步考虑了不同矿物组分的热阻差异，为后续多矿物非均质岩石的热-力耦合行为建模提供了路径示范。

5.3　理论拓展与研究展望

本研究的意义不仅在于揭示了温度循环作用下岩石力学性能的演化规律，更为矿井地热系统的长期安全运行提供了重要理论依据。在深部高温地层中，井壁岩体与回采区围岩长期处于周期性注冷水或自然循环冷却交替作用之下，若不能被准确刻画岩石的温度-裂隙-强度响应，将严重影响井筒稳定性、降低热能提取效率，甚至诱发突水、坍塌等重大工程灾害。通过建立温度、循环次数与岩石物理力学参数的经验关联模型，可为现场工程提供风险评估手段。例如，可将首次循环所引发的强度突降作为预警指标，在现场制定“限温-限频-限速”的热处理制度。模拟结果中裂纹演化的空间规律也可用于构建“温度控制-裂隙监测-稳态保持”三位一体的动态围岩支护策略。

值得指出的是，本研究采用的离散元模拟展示出了良好的热裂纹衍生过程，为含结构性介质（如裂隙型岩体、构造弱面）在温度循环作用下的损伤演化提供了理论工具。未来可结合 CT 重建、三维裂缝提取算法，对不同层理结构、不同岩性组合下的温度-力学-渗流行为开展更高维度的模拟分析。

综上，本文通过试验观测与数值模拟协同研究，系统揭示了砂岩在温度循环环境下多尺度破坏规律，并与工程实践问题进行了有效对接，研究成果不仅丰富了热-力岩石力学的理论内涵，也为深部高温岩体稳定性控制与地热采集效率提升提供了新的技术思路。

6　结论

（1）通过设定不同冷却温度与 8 次高温-冷却循环，系统揭示了砂岩在质量、体积、纵波波速、弹性模量与峰值强度等关键物理力学参数的演化规律。弹性模量在首次循环时即产生最显著劣化，在 0 ℃

条件下弹性模量降幅达 38.8%,峰值强度由 85.00 MPa 降至 40.50 MPa,并呈现“裂纹汇聚-局部滑移-结构松脱”的复合破坏模式。第 8 次循环后,试样体积增加 0.95%～1.34%,且低温冷却效应更强。SEM 结果显示了“粒间键断-微裂扩展-骨架解体”的微观劣化过程,循环次数越多,裂隙最终演化为贯通网络。

(2) 离散元模拟有效捕捉了热裂纹的起裂机制、扩展路径与主控类型,从细观尺度揭示了温度扰动主导的岩体损伤演化过程。构建的考虑温度梯度与岩体非均质性的离散元模型,实现了剪张裂纹的自动识别、总数统计与空间分布特征提取,证实了高温-低温交替加载诱导的热拉应力为主要致裂机制。

(3) 矿井地热环境中,岩体常处于人工开挖扰动与周期性注采水冷热冲击的双重作用之下,裂隙诱导的结构失稳与渗透性能演化问题亟待解决。本研究阐明了宏观-微观-细观一体的多尺度破坏规律,明确了冷却温控参数与循环次数对岩体稳定性的影响机制,研究成果可为深部矿区地热开发过程中的风险预估与能效管理提供理论依据。

参考文献(References):

[1] 蔡美峰,马明辉,潘继良,等.矿产与地热资源共采模式研究现状及展望[J].工程科学学报,2022,44(10):1669-1681.
Cai Meifeng, Ma Minghui, Pan Jiliang, et al. Co-mining of mineral and geothermal resources: a state-of-the-art review and future perspectives[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022,44(10):1669-1681.

[2] 柯丽华,张格格,姚囝,等.矿山低碳生态建设效果评价方法研究及关键影响因素分析[J].矿业研究与开发,2025,45(9):115-124.
Ke Lihua, Zhang Gege, Yao Nan, et al. Research on the evaluation method of low-carbon ecological construction effect in mines and analysis on key influencing factors[J]. Mining Research and Development,2025,45(9):115-124.

[3] 张源,万志军,胡淞博,等.矿井岩溶热储三维地质建模及地热资源潜力评价[J].煤炭学报,2024,49(8):3571-3579.
Zhang Yuan, Wan Zhijun, Hu Songbo, et al. 3D geological modeling of mine karst geothermal reservoir and geothermal resources evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(8):3571-3579.

[4] 魏勇,吉坤,阎鸣泽,等.基于 RSM-BBD 方法的关闭/废弃矿井地热系统长期采热性能研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):273-282.
Wei Yong, Ji Kun, Yan Mingze, et al. Study on long-term heat recovery performance of geothermal system in closed/abandoned mines based on RSM-BBD method[J]. Mining Research and Development,2024,44(12):273-282.

[5] 张瑞瑛,苏伟,刘琪,等.矿井深部热能存取一体化系统研究[J].煤炭工程,2024,56(8):12-18.
Zhang Ruiying, Su Wei, Liu Qi, et al. Research on the storage-extraction integrated system of thermal energy in deep mines[J]. Coal Engineering,2024,56(8):12-18.

[6] 张志强,黄体士,张文科,等.废弃矿井水源热泵抽灌井布置及参数敏感度的研究[J].可再生能源,2024,42(6):750-759.
Zhang Zhiqiang, Huang Tishi, Zhang Wenke, et al. Investigation on the layout and parameter sensitivity for the pumping-recharging wells of water source heat pump of the abandoned mines[J]. Renewable Energy Resources,2024,42(6):750-759.

[7] 沈玉旭,汪家畅,康健婷,等.温度循环冲击作用对煤岩孔裂隙几何分布特征的影响研究[J].矿业研究与开发,2025,45(8):155-161.
Shen Yuxu, Wang Jiachang, Kang Jianting, et al. Study on the effect of temperature cyclic impact on the geometrical distribution characteristics of coal rock pores and fractures [J]. Mining Research and Development, 2025, 45(8): 155-161.

[8] 郭世博.废弃矿井地热资源再开发与循环利用技术[J].能源与环保,2023,45(10):172-178.
Guo Shibo. Technology of redevelopment and recycling of geothermal resources in abandoned mines[J]. China Energy and Environmental Protection,2023,45(10):172-178.

[9] 李晓科,邵保平,蔡佳豪,等.瞬态高温热冲击下岩石传热规律试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(11):155-162.
Li Xiaoke, Xi Baoping, Cai Jiahao, et al. Experimental study on heat transfer law of rock under transient high-temperature thermal shock [J]. Mining Research and Development,2024,44(11):155-162.

[10] 李建林,陈星,党莉,等.高温后砂岩三轴卸荷试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(8):1587-1595.
Li Jianlin, Chen Xing, Dang Li, et al. Triaxial unloading test of sandstone after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(8):1587-1595.

[11] 苏承东,付义胜.红砂岩三轴压缩变形与强度特征的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊 1):3164-3169.
Su Chengdong, Fu Yisheng. Experimental study of triaxial compression deformation and strength characteristics of red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(Suppl.1):3164-3169.

[12] 陈宇龙.多场耦合作用下砂岩渗透率演化规律[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(9):2449-2457.
Chen Yulong. Permeability evolution of sandstone under multi-field coupling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2017,48(9):2449-2457.

[13] Kumari W G P, Ranjith P G, Perera M S A, et al. Temperature-dependent mechanical behaviour of australian strathbogie granite with different cooling treatments[J]. Engineering Geology,2017,229:31-44.

[14] Kumari W G P, Ranjith P G, Perera M S A, et al. Mechanical behaviour of australian strathbogie granite under in-situ stress and temperature conditions: an application to geothermal energy extraction[J]. Geothermics, 2017, 65: 44-59.

[15] Kumari W G P, Ranjith P G, Perera M S A, et al. Experimental investigation of quenching effect on mechanical, microstructural and flow characteristics of reservoir rocks: thermal stimulation method for geothermal energy extraction[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 162: 419-433.

[16] Ali A Y, Bradshaw S M. Bonded-particle modelling of microwave-induced damage in ore particles[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(10): 780-790.

[17] Zhao Zhihong, Liu Zhina, Pu Hai, et al. Effect of thermal treatment on brazilian tensile strength of granites with different grain size distributions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(4): 1293-1303.

[18] Qu Zhanqing, Zhang Wei, Guo Tiankui. Influence of different fracture morphology on heat mining performance of enhanced geothermal systems based on COMSOL[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(29): 18263-18278.

[19] Zhang Weiqiang, Sun Qiang, Hao Shuqing, et al. Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 1297-1304.

[20] Li Man, Liu Xianshan. Experimental and numerical investigation of the failure mechanism and permeability evolution of sandstone based on hydro-mechanical coupling [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 95: 104240.